

УСТАНОВКА ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ НА ПРОБОЙ

Г. А. ВОРОБЬЕВ

(Представлено профессором доктором А. А. Воробьевым)

В настоящее время широко производятся импульсные испытания твердых диэлектриков на пробой. При импульсных испытаниях имеется возможность определить истинную электрическую прочность твердых диэлектриков, когда сведены к минимуму такие факторы, как тепловые эффекты и влияние объемного заряда, снять вольтсекундную характеристику, что позволяет определить время запаздывания разряда в диэлектрике.

Проведение импульсных испытаний диэлектриков на пробой имеет целый ряд особенностей. Длительное время было затруднено при импульсных испытаниях точное определение пробивного напряжения и времени воздействия напряжения. В некоторых работах амплитуда импульса, измеряемая шаровым разрядником, увеличивалась степенями (по 10%) до наступления пробоя. Следовательно, перед пробоем диэлектрик подвергался воздействию нескольких импульсов, и его пробивное напряжение вследствие кумулятивного эффекта могло снизиться, как показано в работах Б. М. Вула [1], А. А. Воробьева [2] и др.

Известно, что при измерении коротких импульсов шаровым разрядником могут быть значительные погрешности. Опыты А. Ф. Вальтера и Л. Д. Инге [3] с применением электронного осциллографа показали, что пробивное напряжение шарового разрядника, облучаемого ультрафиолетовым светом, увеличивается при длительности импульса 10^{-6} сек на 2%, а при длительности 10^{-7} сек — на 10÷12% по сравнению со статическим пробивным напряжением.

Часто форма импульсного напряжения вычислялась по параметрам генерирующего контура. Вычисленная форма импульса может сильно отличаться от действительной, вследствие неучета паразитной индуктивности и паразитной емкости генерирующей цепи и емкости образца.

В работах Иоста [4], Штригеля [5] и других импульс формировался в длинной линии. Измерялось напряжение и подключался образец. Осциллограммы, приведенные в работе Диттерта [4], показывают, что подключение образца диэлектрика может значительно исказить форму и уменьшить амплитуду импульса.

С еще большими погрешностями определялось время воздействия напряжения до пробоя образца.

А. Ф. Вальтер и Л. Д. Инге [6] указывают, что в работах Хандрека, Иоста и др. нельзя было точно определить время воздействия напряже-

ния. Поскольку не применялся электронный осциллограф, то при пробое образца можно было сказать, что время до пробоя не больше длины волны.

Проблема точного измерения импульсного пробивного напряжения и времени воздействия напряжения была разрешена с усовершенствованием высоковольтных электронных осциллографов.

Имеются отдельные электронно-лучевые трубки с напряжением на отклоняющих пластинах в 100 кВ [7]. Однако большинство электронно-лучевых высоковольтных трубок имеет максимальное напряжение на отклоняющих пластинах 1—2 кВ. Для пробоя диэлектриков, как правило, требуются большие напряжения. Для того, чтобы на отклоняющие пластины подать сниженное напряжение импульса, применяются делители напряжения.

Для градуировки осциллографа по горизонтальной оси (оси времени) необходим генератор высокой частоты (Г.В.Ч.)

Таким образом, установка для импульсных испытаний диэлектриков на пробой должна содержать следующие элементы: импульсный генератор, электронный осциллограф, делитель напряжений, Г.В.Ч.

В лаборатории кафедры техники высоких напряжений Томского политехнического института с целью снятия вольтсекундных характеристик твердых диэлектриков небольшой толщины (десятые доли мм) была сконструирована установка и исследованы некоторые схемы. Отдельные элементы этой установки описываются в этой статье.

Импульсный генератор

Имеются различные схемы для формирования импульса: формирующие линии, схемы с емкостями и сопротивлениями, импульсные схемы в сочетании с импульсным трансформатором и некоторые другие.

Длинные линии позволяют формировать прямоугольные импульсы с малой длиной фронта. Однако максимальная длина импульса, получаемая при помощи длинных линий в лабораторных условиях, ограничивается величиной порядка 10^{-6} сек, т. к. для формирования импульсов большей длительности потребовались бы линии длиной несколько тысяч метров и более.

Импульсный трансформатор не позволяет получать на выходе импульсы с длиной фронта менее десятых долей микросекунды.

Схемы с емкостями и сопротивлениями позволяют получать импульсы различной длительности.

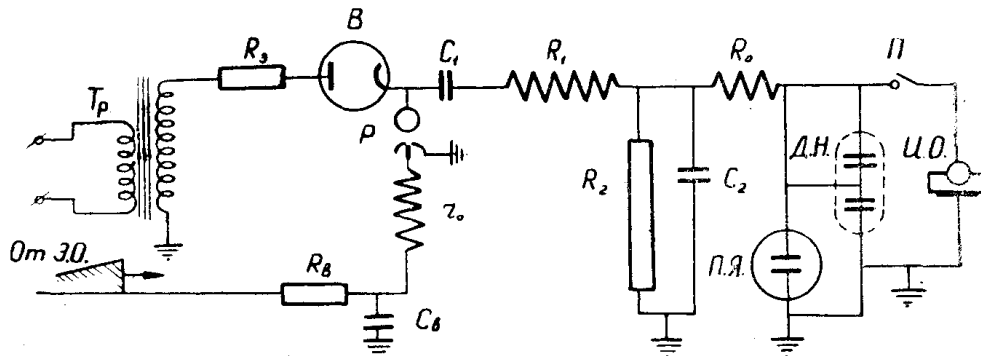
На фиг. 1 представлена схема импульсного генератора, при помощи которого получались импульсные напряжения длительностью от 10^{-7} до 10^{-4} сек. В качестве коммутирующего и синхронизирующего элемента применен тригatron (Р), предложенный в 30-х годах И. С. Стекольниковым.

Для синхронизации работы импульсного генератора и электронного осциллографа применена задерживающая цепь $R_2 C_1$. Изменение этих параметров позволяет в широких пределах менять относительное время включения электронного осциллографа и импульсного генератора.

При срабатывании тригatronа генерирующая емкость C_1 разряжается через сопротивление R_1 на сопротивление R_2 и емкость C_2 . На емкости C_2 возникает двухэкспоненциальная волна напряжения.

В наших опытах исследовались вольт-секундные характеристики. При этом изменение экспозиции напряжения достигалось путем изменения длины фронта импульса. Поскольку в наших опытах длина волны была всегда много больше длины фронта, то последняя определялась ориентировочно значением $3-4 R_1 C_2$.

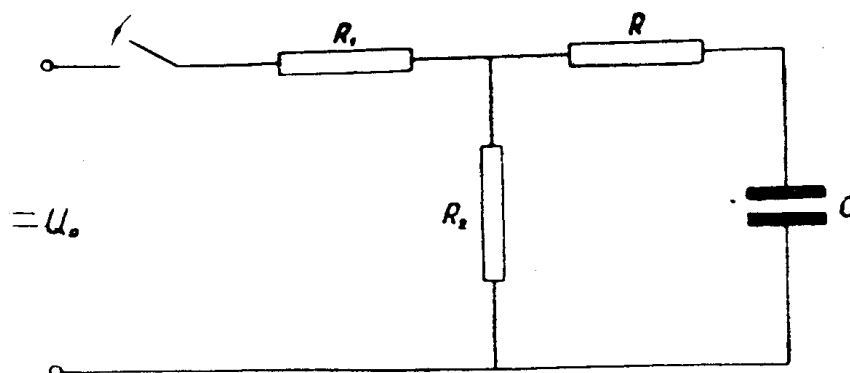
1. В случае больших величин индуктивности и емкости по отношению к земле в генерирующей цепи длина фронта определяется длиной полуволны возникающих в генерирующем контуре колебаний.



2. В случае малых величин указанных в пункте 1 параметров длина фронта импульса определяется временем спада напряжения на разряднике Р при его пробое.

фронта ($3 \div 4 \cdot 10^{-8}$ сек). На плоской части импульса имелись слабые колебания, обусловленные паразитными параметрами генерирующей цепи. Ввиду затруднительности синхронизации импульсного генератора и временной развертки осциллографа при помощи тригatrona при регистрации явлений длительностью порядка 10^{-8} сек генерирующая цепь и цепь временной развертки были жестко связаны. Сопротивления R_1 и R_2 (фиг. 2) были ориентировочно рассчитаны из условия получения необходимой скорости записи. Ориентировочно можно принять, что на цепочку R_1 , R_2 и цепь развертки воздействует волна с отвесным фронтом. Тогда

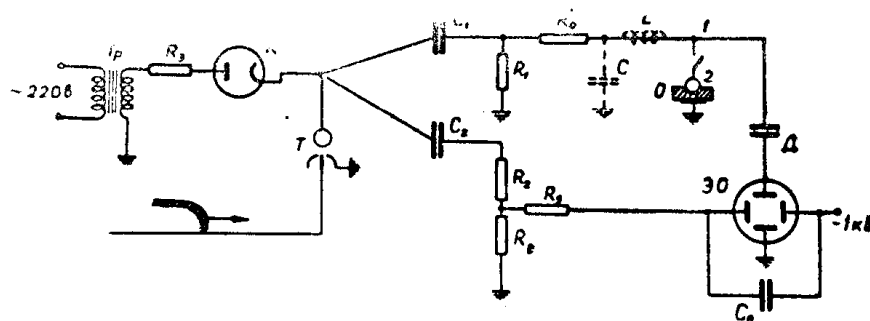
получается расчетная схема, изображенная на фиг. 3, переходный процесс в которой может быть легко рассчитан.



Фиг. 3. Схема к расчету разрядного сопротивления импульсного генератора

Зная необходимое для пробоя напряжение U_0 , напряжение на пластинах временной развертки, их чувствительность по отклонению электронного луча, диаметр экрана электронно-лучевой трубки и необходимую скорость временной развертки, можно определить величины R_1 , R_2 , R , если заданы величина C и соотношение R/R_2 . При этом получаются несколько завышенные значения R_1 , R_2 и R , поскольку длина фронта импульса соизмерима с временем развертки. Более точные значения R_1 , R_2 и R могут быть легко установлены экспериментальным путем.

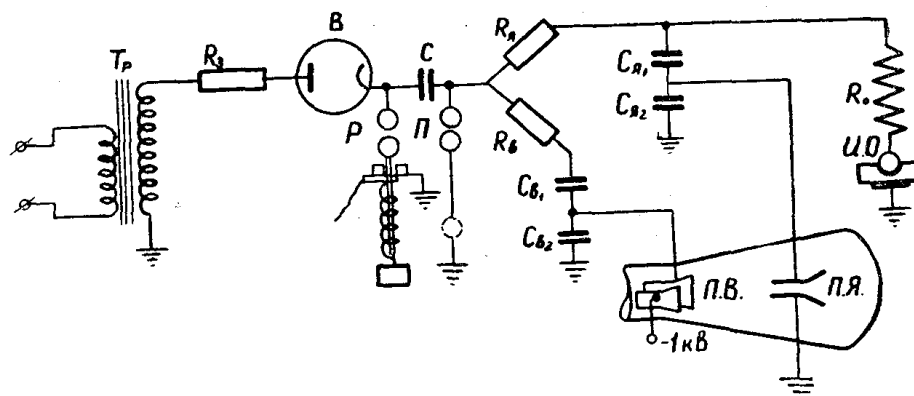
Схема фиг. 2 имеет тот существенный недостаток, что после пробоя образца диэлектрика может резко измениться скорость развертки и явление (например, спад напряжения на образце при его пробое) будет искажено. Поэтому нами была предложена другая схема, экспериментально исследованная К. К. Сончиком [9] и изображенная на фиг. 4.



Фиг. 4. Схема установки с двумя контурами для испытания на пробой диэлектриков при времени воздействия напряжения порядка 10^{-8} сек

Для производства и регистрации импульсов с длиной фронта около 1 сек была принята схема, изображенная на фиг. 5. Большие величины

сопротивлений R_A и R_B обуславливали слабую искру в коммутирующем элементе. При этом нельзя было рассчитывать на ее устойчивость. Поэтому в данной схеме вместо тригатрона применен механический включатель. Элементы схемы R_A , C_{A1} , C_{A2} , R_B , C_{B1} и C_{B2} легко рассчитываются, если известны: напряжение зарядки емкости C , необходимые напряжения на пластинах временной развертки и явления, их чувствительность к



Фиг. 5. Схема установки для испытания на пробой диэлектриков при времени воздействия напряжения порядка 10^{-1} сек

отклонению электронного луча и диаметр электронно-лучевой трубки. Важно отметить, что не следует брать слишком большие величины R_A , поскольку сопротивление образца и окружающей его среды (например, трансформаторного масла) могут быть сравнимы с величиной R_A и емкости C_{A1} и C_{A2} не зарядятся до полного напряжения.

Электронно-лучевой осциллограф

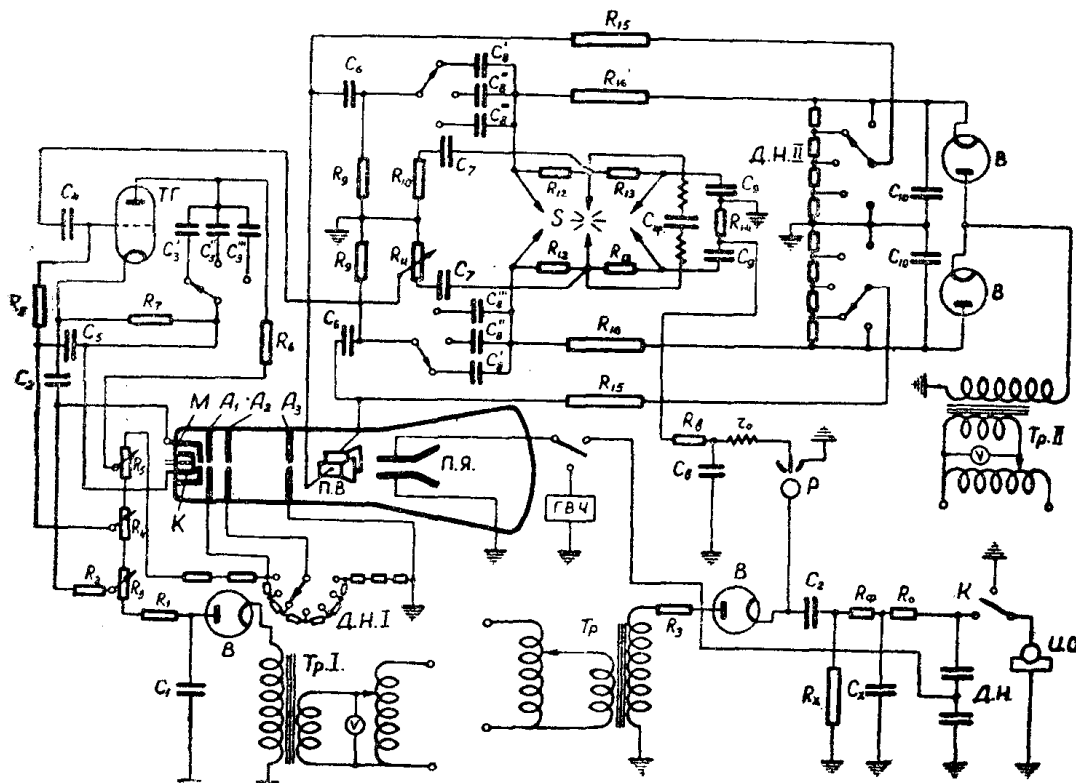
В установке использован электронный осциллограф с принципиальной схемой, любезно предоставленной нам в лаборатории высоковольтного газового разряда энергетического института Академии наук СССР. По предложению проф. доктора А. А. Воробьева в лаборатории каф. ТВН ТПИ И. И. Каляцким, А. М. Трубицыным и автором проводилась работа по освоению работы осциллографа и по его конструированию.

Схема осциллографа представлена на фиг. 6. Электронно-лучевая трубка 13ЛО2С имеет постоянное питание (20—25 кВ). При помощи искросветного реле S осуществляется синхронизация открытия луча (при пробое в среднем промежутке реле S), временной развертки (при пробое левого промежутка) и работы импульсного генератора (при пробое правого промежутка).

Для временной развертки используется напряжение, получаемое на сопротивлениях R_9 при разряде на них конденсаторов C_8 . При этом получается нелинейная временная развертка.

При регистрации коротких явлений по схеме фиг. 2 и импульсов с длиной фронта около 1 сек временная цепь осциллографа отключалась

от пластин времени. В последнем случае (импульсы длительностью около 1 сек) электронный луч был постоянно открыт и имел достаточную для записи явления яркость, которая, с другой стороны, была недостаточной, чтобы вызвать повреждение экрана до подачи исследуемого явления. Параметры схемы осциллографа могут быть сравнительно легко рассчитаны [8].



Фиг. 6. Схема высоковольтного электронного осциллографа и импульсного генератора

Фотография осциллографа представлена на фиг. 7. Высота осциллографа 1,55 м, длина 0,9 м, ширина 0,55 м. Такие размеры осциллографа были выбраны из условия изоляции, а также из условий удобства производить отдельные переключения в осциллографе.

При необходимости можно значительно сократить размеры осциллографа.

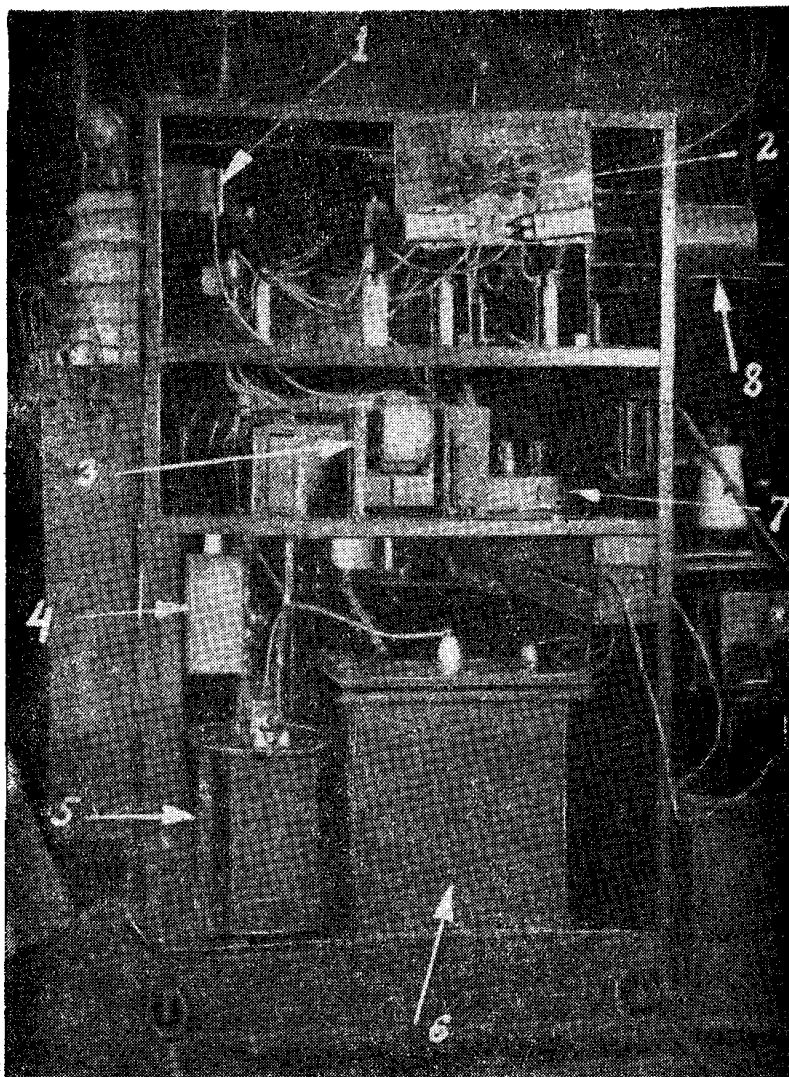
На фиг. 8, 9 и 10 представлены типичные осциллограммы.

Делитель импульсных напряжений

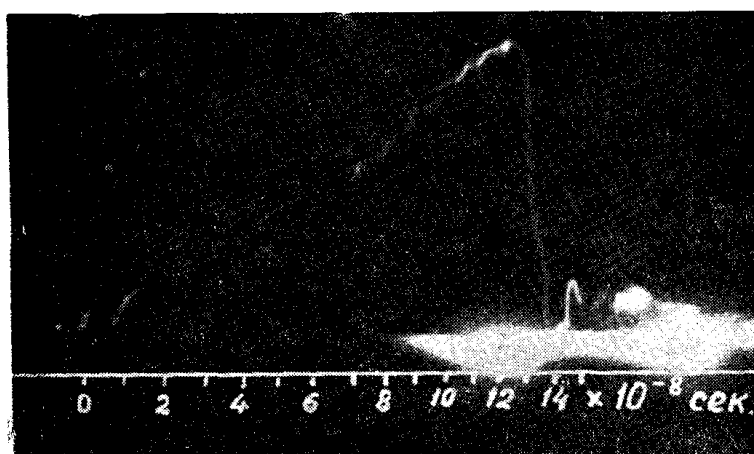
В наших опытах пробивные напряжения достигали величины 60 кв. На пластины явления осциллографа можно было подавать напряжения не более 1,5 кв. Поэтому был необходим делитель импульсных напряжений.

Поскольку предполагалось фиксировать весьма короткие явления, был выбран емкостный тип делителя, схема которого изображена на фиг. 11.

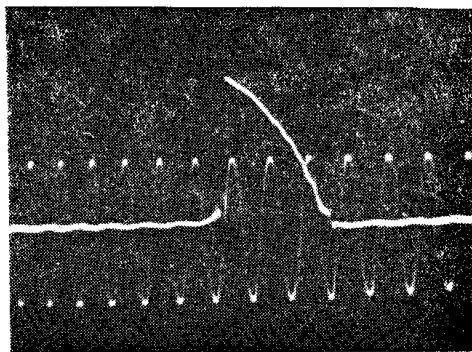
Первая конструкция емкостного делителя изображена на фиг. 12. Емкость между шаровыми электродами соответствует емкости C_1 в схе-



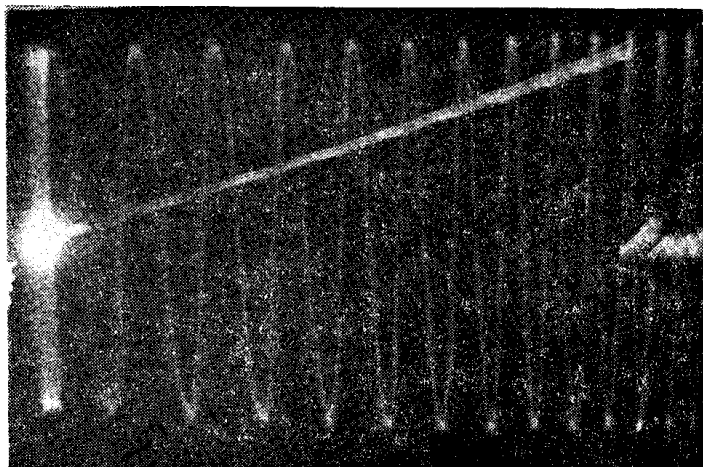
Фиг. 7. Фотография электронного осциллографа (вид сбоку).
 1 — Д.Н. 1; 2 — искросветное реле S; 3 — тр. 2; 4 — С₁;
 5 — тр-р накала выпрямителя В₁; 6 — тр. 1; 7 — Г. В. г.,
 приставка для фотографирования с экрана



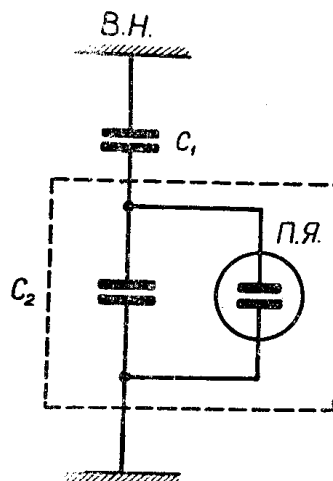
Фиг. 8. Осциллограмма пробоя каменной соли



Фиг. 9. Осциллограмма пробоя каменной соли. Частота градуировочных колебаний 1 мс/ц

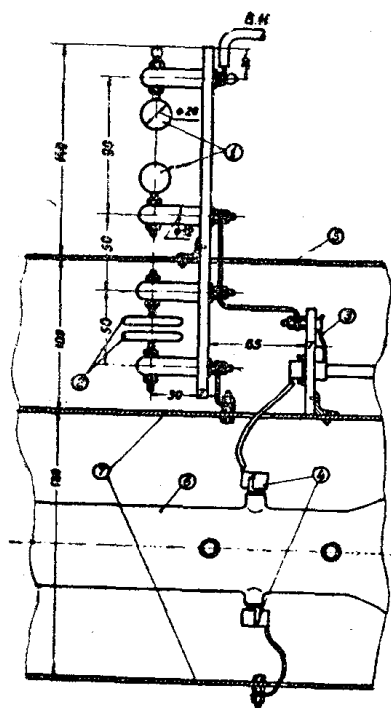


Фиг. 10. Осциллограмма пробоя каменной соли. Частота градуировочных колебаний 50 гц

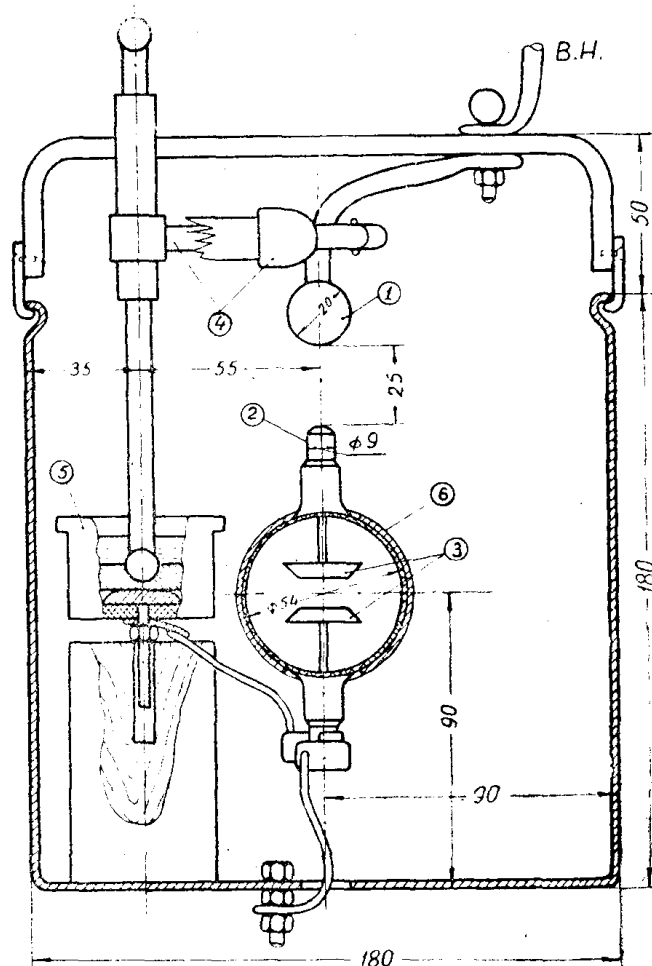


Фиг. 11. Схема емкостного двигателя напряжений

Для регистрации коротких явлений длительностью в несколько миллимикросекунд (такую длительность составляло время спадания напряжения на образце при пробое) был сконструирован емкостный делитель напряжения, схема которого изображена на фиг. 13. При конструировании



В. Н. — высокое напряжение. 1 — шаровые электроды, 2 — плоские электроды, 3 — переключитель пластин явления, 4 — пластины явления, 5 — крышка осциллографа, 6 — электронно-лучевая трубка, 7 — экраняющий кожух электронно-лучевой трубки

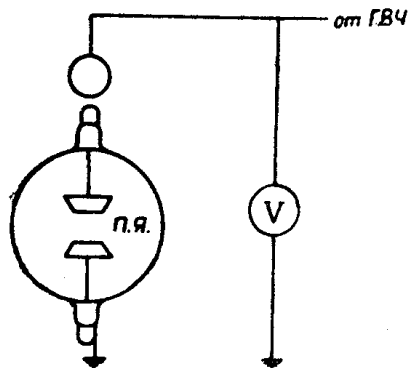


Фиг. 13. Пробойно-осциллографическая установка. В. Н. — высокое напряжение. 1 — высоковольтный электрод, 2 — вывод пластины явления, 3 — пластины явления, 4 — переключатель для подключения образца к высокому напряжению, 5 — пробойник с образцом, 6 — электронно-лучевая трубка

43

C_1 (фиг. 11) здесь соответствует емкость между высоковольтным электродом (до 40 кВ) и выводом верхней пластины явления трубки, емкости C_2 (фиг. 11) — емкость пластин явления.

При работе с емкостными делителями необходимо избегать коронирования, которое может исказить форму импульса и привести к большим погрешностям при измерении. Наличие коронирования определялось по двум явлениям:



Фиг. 14. Схема опыта по определению частотной зависимости коэффициента деления делителя.

1. При сильном коронировании делителя наблюдается резкое отклонение электронного луча по вертикали.

2. При слабом коронировании нулевая линия на экране осциллографа смещается вверх или вниз (в зависимости от полярности импульса и от того, какой электрод коронирует) с воздействием каждого импульса.

По схеме фиг. 14 снималась частотная характеристика делителя. Луч был открыт настолько, чтобы не повредить экран. Коэффициент деления определялся пропорциональной ему величиной,

равной отношению напряжения высокой частоты к высоте полосы на экране осциллографа. В диапазоне $10^5 \div 5,7 \cdot 10^7$ гц коэффициент деления делителя в пределах точности измерений оставался постоянным. Это обстоятельство позволяло при определении пробивного напряжения образца в случае малой экспозиции пользоваться градуировочным графиком (зависимость между напряжением на делителе и отклонением луча на экране осциллографа), снятым при воздействии импульсов длительностью 10^{-6} сек на шаровой разрядник.

Данная работа может быть полезной для лиц, начинающих работать в области импульсного пробоя диэлектриков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вул Б. М. ЖТФ, 2, 3—4, 371, 1931.
2. Воробьев А. А. и Вальтер А. Ф. Пробой фарфора при ударных напряжениях. Труды 3-й Всесоюзной конференции по электроизолирующим материалам, 3, 173, 1934.
3. Вальтер А. Ф. и Инге Л. Д. ЖТФ, 4, 813, 1934.
4. Биндер Л. Блуждающие волны в электрических сетях. Перевод с немецкого, стр. 160, 1935.
5. Strigel R. Электрическая импульсная прочность. Berlin, 1939.
6. Вальтер А. Ф. и Инге Л. Д. ЖТФ, 3, 6, 840, 1933.
7. Hergenthoer R. C., Rudenberg H. I. Proc. IRE, 41, 7, 896, 1953.
8. Воробьев Г. А. Исследование электрического пробоя твердых диэлектриков при различных временах воздействия напряжения. Диссертация, г. Томск, 1956.
9. Сончик К. К. О времени запаздывания разряда в ионных кристаллах. Известия АН СССР, серия физич., том 22, № 4, 1958.